

2016B1159, 2017B1186, 2018B1172, 2019B1274

BL20B2

宇宙観測用軽量高角度分解能硬 X 線望遠鏡の開発 Development of Light-Weight X-ray Mirror with High-Angular Resolution for X-ray Astronomy

井出 峻太郎^a, 松本 浩典^a, 米山 友景^a, 朝倉 一統^a, 野田 博文^a,
田村 啓輔^b, 清水 貞行^c, 吉田 篤史^c, 三石 郁之^c,
栗木 久光^d, 他 FORCE ワーキンググループ

Shuntaro Ide^a, Hironori Matumoto^a, Tomokage Yoneyama^a, Kazunori Asakura^a, Hirobumi Noda^a
Keisuke Tamura^b, Sadayuki Shimizu^c, Atsushi Yoshida^c, Ikuyuki Mitsuishi^c,
Hisamitsu Awaki^d, FORCE Working Group

^a大阪大学 ^bメリーランド大学 ^c名古屋大学 ^d愛媛大学

^aOsaka University, ^bUniversity of Maryland, Baltimore County, ^cNagoya University, ^dEhime University

ほとんど全ての銀河の中心に巨大ブラックホールが存在するが、その成長過程はよくわかっていない。その成長過程を観測的に解明するには、高角度分解能の硬 X 線観測が重要であり、そのために我々は 15 秒角より優れた高角度分解能で大面積の硬 X 線望遠鏡の実現を目指している。現在、シリコン結晶薄板を用いた X 線反射鏡の開発に取り組んでおり、初めて製作された 2 回反射型 1 ペアモジュールの性能を、15 keV と 30 keV の X 線を用いて BL20B2 で評価したところ、モジュールのほぼ全面において、目標の 15 秒角より優れた角度分解能が達成されていることがわかった。

キーワード： X 線天文学、X 線望遠鏡

背景と研究目的：

ほとんど全ての銀河の中心には、太陽の百万倍以上の質量を持つ巨大ブラックホール (BH) が存在する。どのようにして巨大 BH が成長してきたのか、いまだによくわかっていない。そして、巨大 BH の質量は、銀河のバルジの質量と良い相関関係を示すことがわかってきた。これは、巨大 BH と銀河が互いに影響を与えながら共進化していることを示す。巨大 BH の重力半径は、銀河バルジの半径のおおよそ 1000 億分の 1 に過ぎない。こんなにサイズの違うものが、どのようにしてお互いに影響を及ぼしあうのかも不明である。このように、巨大 BH の成長過程の解明は、いまや銀河の成長とも密接に関連することが明らかになっており、現代宇宙物理の最大の謎の一つとなっている。どのようにすれば、観測的に巨大 BH の成長を明らかにできるだろうか？

我々は、X 線観測で巨大 BH 成長を解明しようと考えている。標準的なシナリオでは、宇宙初期に出来た種 BH が、星間物質を飲み込みつつ成長し、巨大 BH になる。巨大 BH が物質を飲み込むと、飲み込まれる物質の重力エネルギーが解放され、X 線が放射される。これを活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) と呼ぶ。つまり、AGN の X 線光度は、巨大 BH が物質を飲み込む割合、すなわち成長率を表す。従って、巨大 BH の成長過程を解明するには、宇宙の果てにある AGN までも X 線で観測し、X 線光度の進化を調べればよい。将来のこのような X 線観測を実現するべく、我々は FORCE (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution) 計画を推進している [1]。

遠方の AGN が出す X 線は、宇宙背景 X 線放射として観測出来る。濃い星間物質に覆われた巨大 BH を持つ AGN をも観測するには、貫通力の強いエネルギー $E > 10 \text{ keV}$ の硬 X 線を観測すればよい。宇宙 X 線背景放射を空間分離して個々の AGN として観測するためには、15 秒角より詳細な角度分解能が必要である。また、宇宙遠方の暗い AGN を観測するには、大集光力も必要である。つまり、巨大 BH の成長過程の解明の鍵は、大集光能力で角度分解能が 15 秒角以上の硬 X 線望遠鏡が必要なのである。

宇宙 X 線観測用の望遠鏡は通常、反射鏡をバウムクーヘンのように並べたウォルター I 型の X 線光学系になる (図 1)。角度分解能を高めるには、高形状精度の反射鏡基板が必要である。限られた口径で集光能力を上げるには、反射鏡のネスト数を増やすしかない。我々は現在口径 40 cm、

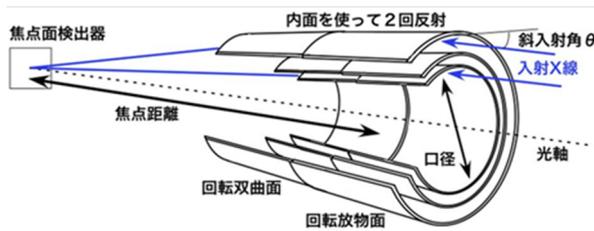


図 1. ウォルターI型 X 線光学系



図 2: 2 回反射 1 ペアモジュール

ネスト数 200 程度を考えている。これを実現するには、反射鏡を薄く ($\sim 0.4\text{mm}$ 程度) するしかない。すなわち、高形状精度の薄板反射鏡基板が必要となる。そこで我々は、NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) で開発中の、シリコン結晶薄板を使った反射鏡に着目した。これは、シリコン結晶を薄く切り出した後に研磨をすることでウォルター型基板を実現するものである[2]。我々は 2015 年ごろより FORCE 計画実現を目指して共同研究を開始し、NASA GSFC 側はシリコン反射鏡基板の作成を担当し、日本側は SPring-8 BL20B2 を用いた性能評価を担当してきた。2016B 期から 2018B 期にかけては、一枚のシリコン反射鏡基板の反射プロファイル測定、反射率測定を行った。これらの結果に基づき、NASA GSFC 側で製作方法に改良を重ね、2019 年には最初の 2 回反射 1 ペアのモジュールが完成した (図 2)。2019B 期において、この第一号モジュールの X 線反射プロファイル測定を行った。紙数の関係から、本稿ではこの実験結果を中心に述べる。

実験：

実験は 2019 年 1 月 26 日～1 月 28 日にかけて、BL20B2 で行なった。その概略を図 3 に示す。X 線入射スリットの下流に治具とミラーを設置し、ミラー中心部から 8.77 m 離れた位置に検出器を置いた。検出器は浜松ホトニクス社製 C12849-1015S であり、ピクセルサイズ $6.5\ \mu\text{m}$ の sCMOS チップを使用したものである。反射鏡モジュール上流のスリットで $10\ \text{mm (H)} \times 1\ \text{mm (V)}$ のビームを作り、反射鏡モジュールと検出器のステージを同期させて動かすことで、反射鏡全体を走査した。X 線のエネルギーは $15\ \text{keV}$ と $30\ \text{keV}$ である。それぞれのエネルギーにおいて、 $10\ \text{mm (H)} \times 1\ \text{mm (V)}$ の X 線ビームでミラー全面を走査した。その様子が図 3 右である。

結果および考察：

図 4 に、 $15\ \text{keV}$ の X 線ビームで、モジュールの真ん中付近を照射した時の反射像を示す。この図を水平軸に射影したプロファイルが図 5 左であり、これを Point Spread Function (PSF) と呼ぶ。図 5 右は、PSF のピークを中心とする領域に入る光子の割合をプロットしたもので、これを Encircled Energy Function (EEF) と呼ぶ。図 5 には、 $30\ \text{keV}$ で測定した PSF と EEF も示してある。なお、1

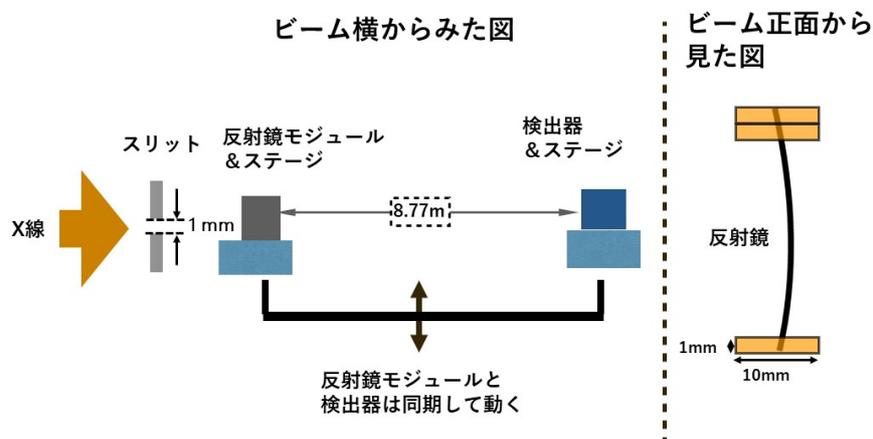


図 3. 実験セットアップ

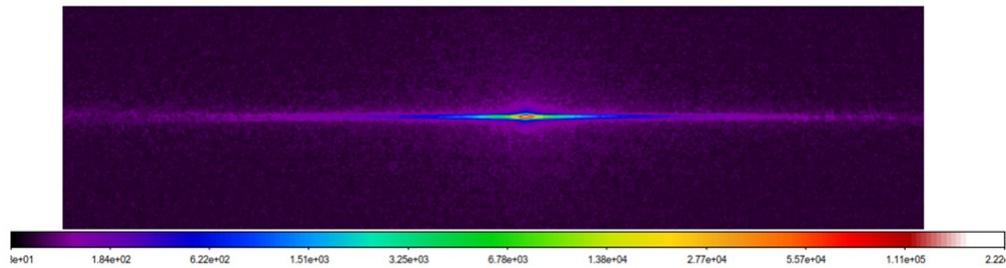


図 4. 15keV の X 線ビームでモジュールの真ん中あたりを照射した時の反射像

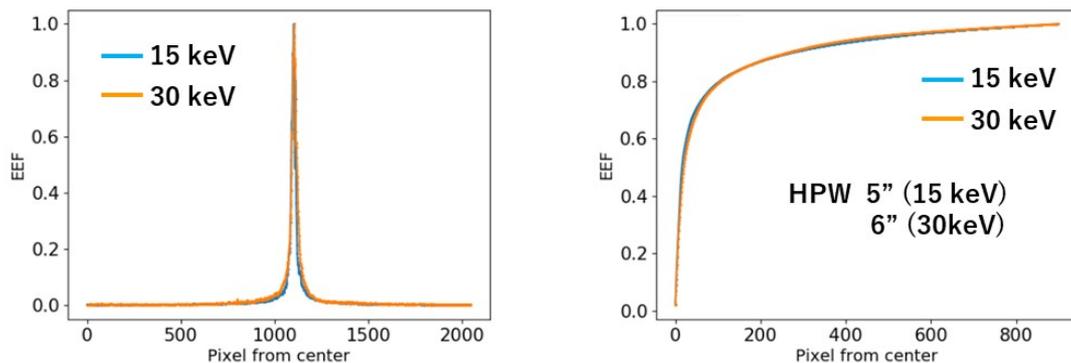


図 5. Point Spread Function (左) と Encircled Energy Function (右)。1 pixel は 0.153 秒角に相当。

ピクセルは 0.153 秒角に対応している。EEF が 0.5 になるときの幅が、一般に X 線天文学で望遠鏡の角度分解能を表す指標として使われており、これを Half Power Width (HPW) と呼ぶ。今回の反射鏡モジュールの中心部分で HPW は 5 秒角 (15 keV) および 6 秒角 (30 keV) であった。

反射鏡モジュールの各部分の反射像を積み重ねて一つにまとめたものが図 6 である。図 6 の上部 (data 91 の近く) は反射鏡モジュールの下部の反射像、図 6 の下部 (data 1 の近く) はモジュール上部の反射像に対応している。図 6 上では 2 か所反射率の低い部分が見られるが、これは反射鏡をモジュール土台に接合している部分に X 線が当たっているからである。この周辺で像の広がりが大きくなっている事から、接合部が反射鏡の形状に影響していることがわかる。図 7 は、図 6 の各反射像から各部分の HPW を計算した結果である。縦軸が HPW、横軸がデータナンバーである。接合部であるデータ 20-30、60-70 あたりを除くと、反射鏡モジュールのほぼ全面において角度分

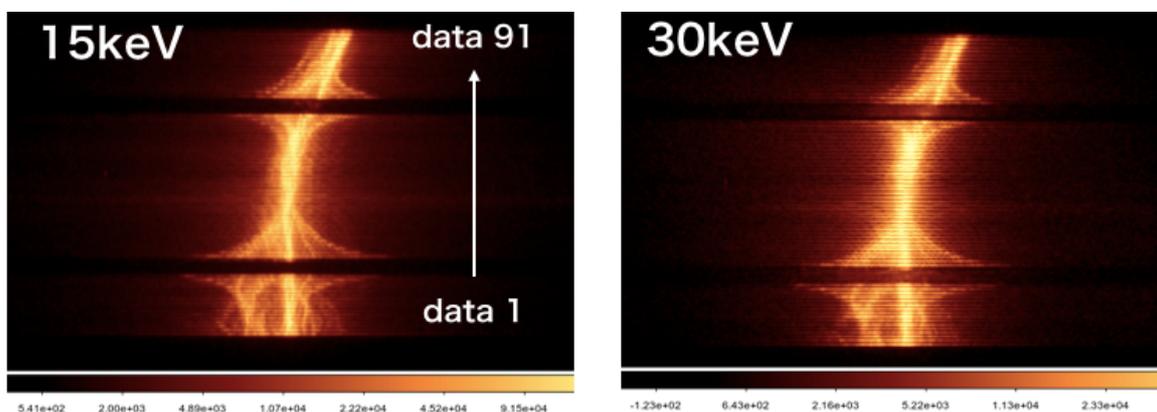


図 6. 反射鏡モジュール各部分からの反射像

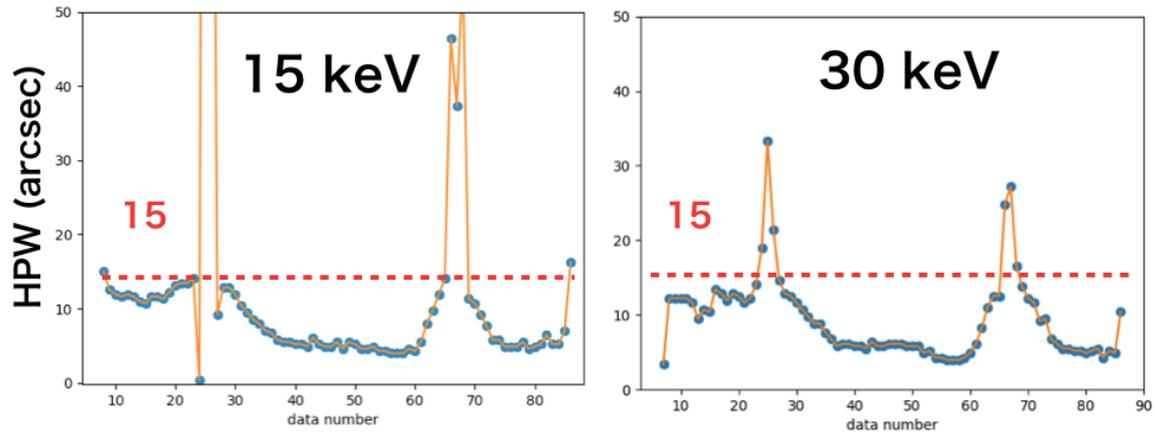


図 7. 反射鏡モジュール各部の HPW

解能の目標値である、15 秒角を達成していることがわかった。全ての反射像を重ね合わせて、

反射鏡モジュール全体の HPW を求めると、15 keV の場合で 14 秒角、30 keV で 12 秒角となり、全面でも目標値である 15 秒角より優れた角度分解能を達成できていることがわかった。

今後の課題:

現在取り組んでいるシリコン反射鏡は、制作方法の関係から、約 10 cm×10 cm のサイズが限度である。従って、想定している口径 40 cm の反射鏡を実現するには、約 5000 枚の反射鏡を並べる必要がある。今回実証したのは 1 ペアの反射鏡モジュールが角度分解能 15 秒角を達成しているということであり、大量の反射鏡を並べたときに 15 秒角より良い性能が出るかどうかはまだ実証されていない。従って、今後は反射鏡 1 枚 1 枚の角度分解能を優れたものにしていくと同時に、望遠鏡を精度よく並べる方法も開発していかなければならない。まずは数ペアのモジュールを完成させることが、近い将来の課題である。

まとめ:

我々は、大面積高角度分解能の硬 X 線宇宙観測を目指し、シリコン結晶薄板を用いた X 線反射鏡の開発を進めている。初めて作成された 2 回反射 1 ペアモジュールは、目標の 15 秒角を達成していることがわかった。今後も研究を進め、大面積高角度分解能の硬 X 線望遠鏡の実現を目指す。

参考文献:

- [1] K. Nakazawa, et al. *Proc. SPIE*, **10699**, 106992D (2018)
- [2] W. W. Zhang, et al. *Proc. SPIE*, **8443**, 84430S (2012)

(Received: March 24, 2020; Early edition: May 27, 2020

Accepted: July 6, 2020; Published: August 21)